选择性激光熔化快速成形技术与装备*

史玉升，鲁中良，章文献，黄树槐，陈国清
（华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室，武汉，430074）

摘　要：介绍了华中科技大学基于粉末材料选择性激光熔化（Selective laser melting，SLM）成形技术的一些最新研究成果，主要包括设备与软件，以及该技术的主要应用领域。由于 SLM 成形过程是一个复杂的物理化学冶金过程，金属粉末熔化快，熔池存在时间短，凝固成形时存在较大的温度梯度与热应力，液态金属表面张力大，因而容易产生翘曲变形、裂纹与球化现象三个国际性难题，针对这些难题，提出了相应的研究方案。

关键词：选择性激光熔化；快速成形；粉末材料；复杂零件和模具
中图分类号：O53.25　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007–9289(2006)05+–0150–04

The Technology and Equipment of Selective Laser Melting

SHI Yu-sheng, LU Zhong-liang，ZHANG Wen-xian，HUANG Shu-huai，CHENG Guo-qing
(State Key Laboratory of Material Processing and Die&Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan,430074)

Abstract: Some up-to-date research productions on Selective laser melting at Huazhong University of Science and Technology are introduced, which mainly includes its devices and software, and the fields applied primarily. In the processing of a complicated physical chemistry metallurgy, due to metal powders melting quickly, melting pond existing short, large temperature gradient and stress caused by temperature gradient, and large surface tension of melting metal powders, there exists three internationalism problems which are warp, crack and balling phenomenon. In order to solve these problems, the paper brings up corresponding investigation schemes.

Key words: selective laser melting, rapid prototyping, powder material, complicated part and mould

0　引　言

选择性激光熔化（Selective laser melting，SLM）技术是近年出现的一种最新快速成形技术，其工作原理如图 1 所示，即应用分层制造思想，用粉末将 CAD 模型转换为零件。由于它采用中小功率激光快速完全熔化选区金属粉末与快速冷却凝固技术，可以获得非平衡态过饱和固溶体及均匀细小的金相组织，致密度近乎 100 %，机械性能与锻造相当[1-4]，并且，成形材料范围广泛（单一金属粉末、复合粉末、高熔点难熔合金粉末等），制造过程不受金属零件复杂结构的限制，无需任何工装模具，工艺简单，实现金属零件和模具的快速制造，降低成本，节约资金，尤其，还能实现组分连续变化的梯度功

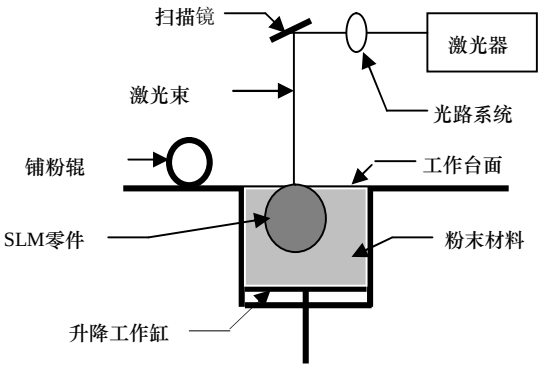


图 1　SLM 成形原理示意图
Fig.1　The sketch map of SLM formation principle

收稿日期：2006-08-01　　修回日期：2006-09-01
作者简介：史玉升（1962-），男（汉），宁夏人，教授，博士后。
基金项目：*湖北省自然科学基金创新群体项目（编号：2004ABC001）；国家科技型中小企业创新基金项目（编号：05C26214201059）。

能材料的制造，其应用领域涉及航空航天、生物及军工等，因此，该技术日益受到国内外专家广泛重视，已成为目前所有快速成形技术中最具发展前景的技术。

在国外，SLM 技术正成为研究的热点，对该技术进行研究的国家主要集中在德国、英国、日本、新加坡与比利时等[1-7]。其中，德国是从事 SLM 技术研究最早与最深入的国家。该技术由德国 Fraunhofer 研究所于 1995 年首次提出，并于 2002 年研究成功，而且，第一台 SLM 系统由德国 MCP–HEK 公司于 2003 年底推出。用该公司生产的 SLM 系统加工出来的工件不需要渗金属，而且能得到致密度为 100 %的零件。该公司声称，任何金属材料和陶瓷材料均能使用，加工出来的零件表面光洁度较高。他们已经利用这种技术制造冲模、压铸模、注塑模、医用植入物、单件金属或者陶瓷零件。这些零件不需要后续热处理和渗金属。英国的利物浦大学是第一个购买和运用 SLM 系统的用户。采用的研究材料有：不锈钢(309L、316L)、工具钢、铝合金和钛合金，金属颗粒大小为 20~50 μm，用氩气保护，制件的精度为±0.1 mm。在国内，目前只有华中科技大学模具国家重点实验室快速制造中心从事 SLM 技术装备的研究，

由于巨大的市场价值与商业机密，SLM 技术的发展与推广存在如下问题：①SLM 系统十分昂贵，送粉时间长，工作效率低，且由于大工作台范围内的预热温度场难以控制，工艺软件不完善，制件翘曲变形大，因而无法直接制作大尺寸零件；②SLM 材料品种有限，制备过程复杂，成本高，且其成分和制备方法保密，只售给购买其 SLM 系统者；③基于 SLM 技术的金属零件/模具的制造工艺成本高。只有解决以上问题，研发出可靠性和技术指标达到国际先进水平、价格低廉、具有自主知识产权的 SLM 系统、成形材料和配套的工艺路线，才能在我国推广这项技术。为此，华中科技大学快速制造中心从 2003 年开始，进行了大量的前期研究工作，主要从高性能、高可靠、低成本 SLM 主机及其软件，适合不同用途的低成本 SLM 材料及其制备方法，金属零件、具有随形冷却流道的模具和梯度功能材料的快速制造工艺等方面进行系统研究，并在 SLM 系统制造技术上取得创新和突破，已经推出采用半导体泵浦 150 W YAG 激光器和采用 100 W 光纤激光器的 SLM 设备，最终目标是形成适合我国国情的高性能、高可靠、低成本成套 SLM 快速制造体系，并在我国推广应用，以提高我国企业新产品的开发速度和参与国际竞争的能力。

因此，文中将主要介绍华中科技大学模具国家重点实验室快速制造中心在 SLM 技术方面的最新研究成果。

1　SLM 系统及其配套技术

1.1　SLM 系统

1.1.1 HRPM-I 系统

(1) 主机

HRPM–I 系统主机主要由 YAG 激光器及扫描装置、检测装置、自动送粉装置、可升降工作台、预热装置、等组成，主要性能参数见表 1。针对现有国外 SLM 系统难以直接制造大尺寸零件的现状，从预热装置、预热温度控制和激光扫描方式等相关方面进行攻关和创新，解决大尺寸 SLM 零件易于变形的难题，开发目前世界上最大工作台面（250 mm×250 mm）的 SLM 系统（如图 2 所示）。

(2) 控制系统

HRPM–I 控制系统的硬件由控制系统、传感检测装置和驱动单元等部分组成。为了达到高性能、高可靠和低成本的目的，我们提出了基于软件芯片的控制系统结构。该控制系统由接口模板、驱动单元、检测装置等部分组成，用软件来实现原来由硬件完成的许多功能，在保证可靠性和技术指标要求的前提下，大幅度降低控制系统硬件的成本。

1.1.2 HRPM–Ⅱ系统

HRPM–Ⅱ系统的主机和控制系统与 HRPM–I 系统基本相同，最大的区别在于激光器与送粉装置，该系统如图 3 所示，主要性能参数见表 1。HRPM–I 系统采用双缸下送粉方式，设备体积庞大，制造成本高，送粉时间长，影响制件生产效率。为此，我们经过大量的调研后，提出用上送粉方式代替原有的下送粉方式的方案。该上送粉装置由粉桶、检测单元、粉量自动分配单元、铺粉单元等部分组成。HRPM–Ⅱ系统采用 SPI 公司制造的 redPOWER^{TM} 类型 100 W 光纤激光器，该激光器具有如下优点：低噪音、高稳定输出(±1%的功率漂移)、较长的使用寿命（3 万个小时）、功率衰减慢、

光斑可聚焦到小于 10 μm、M^2<1.1 等优点，因此，降低了成本，提高了制件质量，尤其在超轻结构复杂件的制备方面 HRPM–Ⅱ具有较强的优势。

表 1 华中科技大学开发的 HRPM 系统主要性能参数

Table 1 The main performance parameters of HRPM systems developed by HUST

型号	HRPM–I	HRPM–Ⅱ
成形空间/(Lmm×Wmm×Hmm)	250×250×450	250×250×400
激光器功率/W 类型	150 YAG	100 连续模式光纤激光器
激光扫描方式	三维振镜动态聚焦	二维振镜聚焦
激光定位精度/mm	0.02	0.02
激光最大扫描速度/(m/s)	5	5
成形速度/(mm^3/h)	≥7000	≥7000
金属粉末铺粉层厚度/μm	50~100	50~100
送粉方式	双缸下送粉	双缸上送粉

图 2 HRPM–I 系统

Fig.2 The system of HRPM-I

图 3 HRPM–Ⅱ系统

Fig.3 The system of HRPM-Ⅱ

1.2 软 件

1.2.1 在线实时区域自适应切片

目前商品化的 SLM 系统，一般都采用等厚切片的方法，即在同一零件的加工过程中，切片厚度一直不变。为了既保证制件的表面质量，又提高成形效率，人们一直在研发在线实时自适应切片算法及其软件。本项目提出并实施的区域自适应切片方法与传统的自适应切片方法不同，它不仅能够对 CAD 模型在不同高度位置采取自适应分层，还能够将其扩展到一个切片层的不同区域，适合于采用所有文件格式的快速成形系统，在保证制件精度的前提下，能够提高成形速度和减少运行成本。

1.2.2 直接切片

自快速成形技术诞生以来，其三维 CAD 模型一直采用 STL 格式近似表示。当用 STL 文件表示设计模型的高次曲面时，往往会出现文件大、精度低等问题，直接影响最终制件的精度与快速成形系统的数据处理能力。为此，从事快速成形技术研究的工作者，多年来一直进行不经 STL 文件直接对三维 CAD 模型进行直接切片的研究，但至今未见商业化应用的报道。为解决这一难题，我们提出并开发成功达到实用化水平的直接切片软件系统。

1.2.3 工艺参数智能规划

目前，SLM 工艺参数，主要凭实验来确定，工作量大，效率低。为了解决这一问题，我们引入神经网络和专家系统技术，建立 SLM 工艺参数规划智能系统。

1.2.4 分区变向和复合扫描

在扫描方式方面，我们提出一种新的分区变向扫描方式，以便提高成形效率，减小制件的翘曲变形。同时将分区变向和轮廓扫描方式相结合，根据他们不同的特点，将一个层面复杂的多连通扫描区域划分成一系列简单的单连通区域，在不同的扫描区域采用不同的扫描方式，构成一种新的复合扫描方式，用于高精度 SLM 零件的制作。

1.2.5 STL 文件容错切片

不同的 CAD 系统在输出 STL 文件时，或多或少都可能出现 STL 文件错误，该错误会影响制件的质量，常用纠错软件只能对少量错误进行纠错，错误过多时，需人工纠错。针对这一不足，我们提出了容错切片的思想和方法，即使 STL 模型存在错误，容错切片算法也能全自动地完成切片过程。

2 目前的应用领域

（图 4~图 7 的照片均来自 THE UNIVERSITY of LIVERPOOL in UK）

(1) 超轻航空航天部件的快速制造（图 4）

在满足各种性能要求的前提下，与传统方法制造的零件相比，用 SLM 方法制造的零件的重量可以减轻 90 %左右。

(2) 刀具的快速制造（图 5）

用 SLM 方法可以快速制造具有随形冷却流道的刀具和模具，使其冷却效果更好，从而减少冷却

时间，提高生产效率和产品质量。

(3) 微散热器的快速制造（图 6）

用 SLM 方法可以快速制造具有交叉流道的微散热器，流道结构尺寸目前可以做到 0.5 mm，表面粗糙度可以达到 Ra = 8.5μ:m。这种微散热器可以用于冷却高能量密度的微处理器芯片、激光二极管等具有集中热源的器件，主要应用于航空电子领域。

(4) 生物制造（图 7）

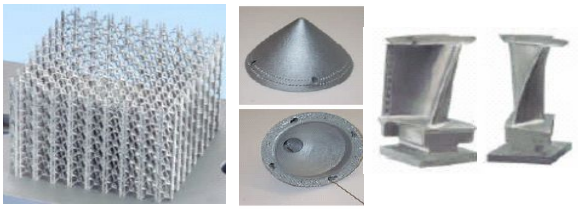
将 SLM 方法用于制造，具有下列优点：①能够制造多孔生物构件；②生物构件的密度可以任意变化；③构件体积孔隙度可以达到 75 %~95 %。

3　SLM 成形过程中存在的主要问题

(1) 球化效应：在 SLM 快速成形过程中，由于熔化的金属表面张力很高，所以容易产生球化效应。这种球化效应将会导致制件内部空洞增多，密度和强度降低，表面粗糙，甚至影响加工过程的进行。

(2) 翘曲变形与裂纹：SLM 成形过程是一个复杂的物理化学冶金过程，金属粉末熔化快，熔池存在时间短，快速凝固成形时存在较大的温度梯度，以致于容易产生较大的热应力，以及冷却过程中会发生组织转变，不同的组织热膨胀系数不一样，也会产生组织应力，并且，凝固组织还存在残余应力，这 3 种应力的综合作用将会导致制件的翘曲变形与裂纹。

这两个问题已经成为普遍性的国际性难题，国外进行了一些初步研究，但是还没有找到合适的解决方案。因此，为了能够攻克这些技术瓶颈，本文作者认为必须研究激光与金属粉末作用机理（温升、熔化、流动和凝固等）；激光作用下粉床的温度场变化规律；激光作用下的应力场；球化效应、翘曲变形及裂纹与金属的热物性以及 SLM 成形工艺之间的关系。



(a)钛结构件（25mm^3）　(b) 飞机前端锥　　(c) 飞机叶片

图 4　用 SLM 方法制造的航空超轻金属件

Fig.4 The ultra-light metal parts for aviation made in SLM (a) The part made from Ti (b) The former prick of plane (c) The plane vanes

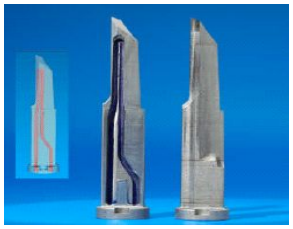
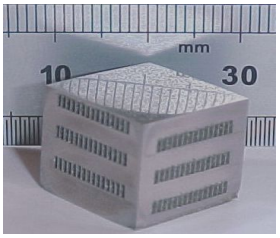


图 5　用 SLM 方法制造的具有随形冷却流道的刀具

Fig.5 The cutters with conformal cooling channel in SLM

(a)



(b)

图 6　金属微热交换器

Fig.6 The metal tepidity heat exchangers

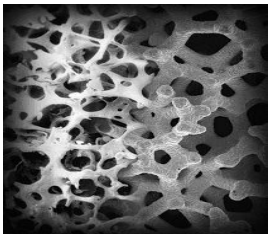


图 7　用 SLM 方法制造的多孔生物构件的 SEM 照片

Fig.7 The SEM picture of biology component with much hole in SLM

参考文献：

[1] www.mcp-group.com [EB/OL].

[2] www.fockeleundschwarze.de[EB/OL].

[3] www.manufacturingtalk.com [EB/OL].

[4] www.trumpf.com [EB/OL].

[5] Lu L., Fuh , J.Y.H., Chen Z.D. et al. In situ formation of TiC composite using selective laser melting [J]. Materials Research Bulletin, 2000, 35(9): 1555-1561.

[6] F Abe, E Costa Santors, Y Kitamura. Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(7): 711-719.

[7] Kruth J.P., Froyen L., Van Vaerenbergh J. et al. Selective laser melting of iron-based powder [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1-3): 616-622.

作者地址：武汉市华中科技大学材料成型实验室 430074

Tel：（027）87557042（O），（027）87543396（H）

E-mail :shiyusheng@263.net；　13554322648(鲁中良)